1Г

УДК 004.89

М.І. Горбійчук[1], С.Т. Самуляк[1], І.В. Щупак[2]
[1]Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, Україна
[2]ДП «Укрметртестстандарт», м. Київ, Україна
gorb@nung.edu.ua, scipion.st@gmail.com, shchupak@gmail.com

Синтез функцій класифікації на основі генетичних алгоритмів

У даній статті запропонований метод побудови роздільних поверхонь на основі генетичних алгоритмів. Розроблений спосіб розбиття простору ознак на класи дає можливість вибрати оптимальні за складністю поліноми, які описують роздільні криві. Ефективність такого методу підтверджена промисловими даними. Отримані результати відкривають можливості для здійснення оперативного технічного діагностування і виявлення окремих вузлів газоперекачувального агрегату з критичним рівнем вібрації, що робить можливою його безаварійну експлуатацію.

Вступ

Діагностування різноманітних об’єктів ґрунтується на визначенні їх технічних станів, які характеризуються певною сукупністю діагностичних ознак. Діагностичні ознаки утворюють багатовимірний простір, який необхідно розбити на класи, кожний із яких характеризує технічний стан об’єкта, що діагностується. Для визначення границь класів використовують поліноміальні роздільні функції другого порядку і вище [1]. При цьому апріорі допускається, що структура такої функції наперед відома і задачею побудови класифікатора на основі роздільних функції є визначення її параметрів, які розраховуються, як правило, методом найменших квадратів [2]. Насправді від структури роздільної функції значною мірою залежить ймовірність хибної відмови під час діагностування, і така структура, як правило, наперед невідома.

Метою даної роботи є розробка методу побудови роздільних поверхонь на основі генетичних алгоритмів, що дозволить вибрати оптимальну структуру полінома, який описує таку поверхню.

Методи побудови функцій класифікації

Допускається, що у просторі ознак кожна діагностична ознака віднесена до певного класу. Необхідно побудувати роздільну поверхню між першим і другим класами; потім між другим і третім класами і т.д. Отже, задача побудови роздільних функцій між M класами зводиться до побудови роздільних функцій між двома класами.

Нехай перший клас вміщує N_o, а другий відповідно – N_w діагностичних ознак. Тоді алгоритм знаходження роздільної функції між двома класами ґрунтується на мінімізації наступного функціонала [2]:

$$F(\bar{a})=\frac{1}{N_o}\sum_{i=1}^{N_o}\left(f\left(\bar{x}^{oi},\bar{a}\right)-1\right)^2+\frac{1}{N_w}\sum_{i=1}^{N_w}\left(f\left(\bar{x}^{wi},\bar{a}\right)+1\right)^2, \qquad (1)$$

де $\bar{a}=\left(a_0,a_1,...,a_n\right)^T$ – вектор параметрів роздільної функції;

$f\left(\overline{x}^{i},\overline{a}\right)$ – роздільна функція, така, що для першого класу $f\left(\overline{x}^{oi},\overline{a}\right)\approx 1$, а для другого – $f\left(\overline{x}^{wi},\overline{a}\right)\approx -1$;

$\overline{x}^{i}$ – вектор координат діагностичних ознак в m-вимірному просторі (індекс «*o*» означає, що діагностична ознака відноситься до першого класу, а індекс «*w*» відносить діагностичну ознаку до другого класу).

Якщо функцію $f\left(\overline{x},\overline{a}\right)$ вибрати лінійною відносно її параметрів

$$f\left(\overline{x},\overline{a}\right)=\sum_{k=0}^{n-1}a_k\varphi_k\left(\overline{x}\right), \tag{2}$$

то мінімізація функціонала (1) за вектором параметрів $\overline{a}$ приводить до такого матричного рівняння:

$$A\overline{a}=\overline{b}\ , \tag{3}$$

де A – квадратна матриця розміром n, елементи якої

$$a_{jk}=\frac{1}{N_o}\sum_{i=1}^{N_o}\varphi_j\left(\overline{x}^{oi}\right)\varphi_k\left(\overline{x}^{oi}\right)+\frac{1}{N_w}\sum_{i=1}^{N_w}\varphi_j\left(\overline{x}^{wi}\right)\varphi_k\left(\overline{x}^{wi}\right); \tag{4}$$

$$b_j=\frac{1}{N_o}\sum_{i=1}^{N_o}\varphi_j\left(\overline{x}^{oi}\right)-\frac{1}{N_w}\sum_{i=1}^{N_w}\varphi_j\left(\overline{x}^{wi}\right),\ j,k=\overline{0,n-1}. \tag{5}$$

У тому випадку, коли роздільна поверхня описується поліномом степені r

$$f\left(\overline{x},\overline{a}\right)=\sum_{k=0}^{n-1}a_k\prod_{\nu=1}^{r}x_j^{s_{\nu k}}\ , \tag{6}$$

де n – кількість членів полінома;

a_k – коефіцієнти полінома;

s_{ji} – степені аргументів, які повинні задовольняти обмеженню $\sum_{\nu=1}^{n}s_{\nu k}\le r$.

Число членів n полінома (6) визначають за такою формулою [3]

$$n=\frac{\left(m+r\right)!}{m!r!}. \tag{7}$$

Знайдена за допомогою мінімізації функціонала (1) роздільна функція (2) має суттєвий недолік [2], який полягає у тому, що структура функції класифікації залежить від щільності розподілу діагностичних ознак, віддалених від межі між класами. На практиці щільність діагностичних ознак біля межі, як правило, менша ніж на віддаленні від межі, що приводить до невідповідності отриманої роздільної функції дійсній межі між класами.

Для синтезу ефективної роздільної функції необхідно враховувати діагностичні ознаки, які близькі до межі між класами у більшій степені ніж віддалені від неї. Це досягається [2] уведенням у структуру функціонала (1) експоненціальної вагової функції

$$W\left(f\right)=e^{-\beta f^{2\alpha}}\ , \tag{8}$$

де α і β – параметри, що визначають швидкість зменшення функції (8) при віддаленні від нульового значення.

Із врахуванням вагової функції (8) функціонал (1) набуде такого значення [2]:

$$F\left(\overline{a}\right)=\frac{1}{\sum_{i=1}^{N_o}W\left(f\left(\overline{x}^{oi},\overline{a}\right)\right)}\sum_{i=1}^{N_o}W\left(f\left(\overline{x}^{oi},\overline{a}\right)\right)\left(f\left(\overline{x}^{oi},\overline{a}\right)-1\right)^2+$$

$$+\frac{1}{\sum_{i=1}^{N_w}W\left(f\left(\overline{x}^{wi},\overline{a}\right)\right)}\sum_{i=1}^{N_w}W\left(f\left(\overline{x}^{wi},\overline{a}\right)\right)\left(f\left(\overline{x}^{wi},\overline{a}\right)+1\right)^2. \quad (9)$$

Таким чином, якщо рівняння роздільної кривої вибрано у вигляді полінома (6), то задача синтезу відповідної роздільної функції між двома класами діагностичних ознак зводиться не тільки до визначення вектора параметрів $\overline{a}$ шляхом мінімізації функціонала (9), але й до знаходження структури полінома (6), такої, щоб функціонал (9) набув мінімального значення.

Синтез структури полінома для роздільної функції

На практиці, як правило, структура роздільної функції (6) невідома, що приводить до необхідності довільного вибору як числа функцій, так і вигляду самих функцій у виразі (6).

Утворимо упорядковану структуру довжиною n, в якій на k-му місці буде стояти одиниця або нуль залежно від того, чи параметр a_k, $k=\overline{0,n-1}$ роздільної функції (6) відмінний від нуля, чи нульовий. У теорії генетичних алгоритмів така упорядкована послідовність має назву хромосоми або особини, а атомарний елемент хромосоми (одиниця або нуль) – це ген. Набір хромосом утворює популяцію. Важливим поняттям у теорії генетичних алгоритмів є функція пристосування, яка визначає ступінь пристосування окремих особин у популяції. Вона дає змогу із всієї популяції вибрати особини, які є найбільш пристосованими, тобто такі, які мають найбільше (найменше) значення функції пристосування. У задачі синтезу структури роздільної функції функцією пристосованості виступає функціонал (9).

Таким чином, задачу синтезу роздільної функції сформуємо наступним чином: із початкової популяції хромосом шляхом еволюційного відбору вибрати таку хромосому, яка забезпечує найкраще значення функції пристосування (мінімальне значення функціонала (9)).

Генетичний алгоритм складається із наступних кроків [4].

K1. **Формування початкової популяції (ініціалізація).** На першому кроці роботи алгоритму випадковим чином формується популяція із I особин, кожна із яких є хромосомою довжиною n. Число генів у хромосомі визначається формулою (7).

K2. **Оцінка пристосованості хромосоми у популяції.** Для кожної хромосоми обчислюється функціонал (9). Здійснюється така процедура наступним чином. Формується поліном r-ї степені, який асоційований з відповідною хромосомою із популяції I, тобто у такому поліномі присутні тільки k-і коефіцієнти, якщо на k-х позиціях хромосоми розміщені одиниці. Після підстановки отриманого у такий спосіб полінома у вираз (9) формуємо функціонал, який необхідно мінімізувати відносно вектора параметрів $\overline{a}$ моделі (6). На відміну від задачі мінімізації функціонала (1), яка звелась до розв’язку лінійного матричного рівняння (3), тепер ми отримуємо задачу нелінійної безумовної мінімізації. Враховуючи те, що функціонал (9) має досить складну струк-

туру, був вибраний безградієнтний метод Нелдера-Міда знаходження мінімуму задачі (9) [4]. Як нульове наближення використовувався розв'язок, який дає мінімізація функціонала (1). У результаті на кроці *К2* отримують значення параметрів $\overline{a}_d$ моделі (6) та її мінімальне значення $\min\limits_{\overline{a}_d} F_q\left(\overline{a}_d\right)$, $q=\overline{1,I}$, де l – кількість одиниць у вибраній хромосомі.

К3. **Перевірка умови зупинки алгоритму.** Для кожної хромосоми обчислюють значення функціонала (9) – $F_q\left(\overline{a}_d\right)$ і вибирають мінімальне значення серед них:

$$F_{\min}\left(\overline{a}_d\right)=\min_{q\in I}:F_q\left(\overline{a}_d\right). \quad (10)$$

Якщо мінімальне значення (10) критерію селекції (9) не перевершує деякого додатного значення ε, то відбувається зупинка алгоритму. Зупинка алгоритму також може відбутися у випадку, коли його виконання не приводить до покращення роздільної функції або у тому випадку, коли алгоритмом уже виконано задане число ітерацій.

Після виконання однієї із трьох умов із популяції вибирається хромосома ch^*, для якої виконується умова (10). Ця хромосома і задає структуру моделі оптимальної.

К4. **Селекція хромосом.** За розрахованими на другому кроці значеннями роздільної функції здійснюється відбір тих хромосом, які будуть брати участь у створенні потомків для наступної популяції. Такий вибір проводиться відповідно до принципу природного відбору, коли найбільші шанси у створенні нової популяції мають хромосоми з найкращим значенням функції пристосування, тобто такі, що забезпечують мінімальне значення критеріїв селекції (1).

Найбільш поширеними методами селекції [5] є метод рулетки і метод турнірної селекції. Метод рулетки можна застосовувати тільки у задачах максимізації [5]. Турнірний метод можна використовувати як у задачах максимізації, так і у задачах мінімізації функцій. При турнірній селекції всі хромосоми розбиваються на підгрупи з наступним вибором 3із кожної утвореної підгрупи хромосоми з найкращою пристосованістю. Підгрупи можуть мати довільний розмір, але частіше за все популяції ділять на підгрупи по 2 – 3 особини у кожній.

К5. **Формування нової популяції потомків** здійснюється за допомогою двох основних операторів: схрещування і мутації. Слід відмітити, що оператор мутації відіграє другорядну роль порівняно з оператором схрещування. Це означає, що у генетичному алгоритмі схрещування проводиться майже завжди, а мутація – досить рідко. Вірогідність схрещування досить велика ($0,5\le P_c\le 1$), тоді як ймовірність мутації вибирається досить малою ($0\le P_m\le 0,1$).

Оператор мутації з ймовірністю P_m змінює значення гена в хромосомі на протилежне, тобто з 1 на 0 чи з 0 на 1. Ймовірність мутації P_m може емалюватись випадковим чином випадковим вибором числа із інтервалу [0;1] для кожного гена і відбором для виконання цієї операції тих генів, для яких розігране число виявиться меншим аби рівним P_m. Мутація може здійснюватись як над пулом родичів, так і над пулом потомків.

Оператор схрещування складається із двох етапів. На першому етапі формуються підгрупи із z осіб, звідки вибирається найкраща хромосома за критерієм селекції $F\left(ch^*\right)=\min\limits_i F\left(ch_i\right)$. У результаті отримуємо нову популяцію хромосом, до якої застосовують оператор другого етапу.

На другому етапі здійснюється схрещування. Для цього із пулу родичів $M(k)$ випадковим чином з ймовірністю P_c утворюють пари у такий спосіб. Із популяції осіб випадковим чином вибирається пара хромосом. Генерується випадкове число P_z із інтервалу [0; 1], і якщо його значення не більше ніж P_c, то над парою хромосом здійснюється схрещування. У протилежному випадку пара хромосом залишається без зміни. Потім для кожної пари родичів розігрується позиція гена (локус) в хромосомі, що визначає точку схрещування. Якщо хромосома кожного із родичів включає у себе n генів, то точка схрещування L_c – це натуральне число, яке менше n. Тому фіксація точки схрещування зводиться до випадкового вибору цілого числа із інтервалу [1; L_c-1]. Дія оператора схрещування приводить до того, що із пари родичів утворюється нова пара потомків наступним чином: перший потомок у парі, хромосома якого на позиціях від 1 до L_c складається із генів першого родича, а на позиція від L_c+1 до n із генів другого родича; другий потомок у парі, хромосома якого на позиціях від 1 до L_c складається із генів другого родича, а на позиція від L_c+1 до n із генів першого родича.

Після виконання оператора схрещування відбувається перехід до К2.

Приклад побудови роздільної поверхні

Сучасні газоперекачувальні агрегати (ГПА) оснащені інформаційно-вимірювальними системами, які серед інших технологічних параметрів вимірюють такі вібраційні характеристики відцентрових нагнітачів (ВЦН) природного газу, як віброшвидкість та віброприскорення. Місце встановлення вібродавачів, методика проведення випробувань і визначення вібраційних характеристик ВЦН регламентуються нормативними документами [6], [7]. Відповідно до [7] технічного стану підшипників ВЦН характеризується середніми квадратичними значеннями віброшвидкості σ_v (*мм*/*с*) та середніми квадратичними значеннями віброприскорення σ_a (*м*/*с*^{2}).

При такому способі періодичного контролю технічного стану ГПА може відбутися пропуск моменту, коли вібраційні характеристики вийдуть за допустимі межі. Як альтернативу у роботі [8] запропоновано перейти до оперативного технічного діагностування окремих вузлів ГПА, за якого надходження інформації про технічний стан об’єкта відбувається із наперед заданою стратегією у процесі функціонування об’єкта.

Задачу оперативного технічного діагностування стану ГПА за результатами віброконтролю автори роботи [8] розглядають як задачу розпізнавання образів, коли технічний стан ГПА характеризується певним набором діагностичних параметрів. Зміна діагностичних параметрів приводить до зміни технічного стану ГПА, так що сукупність таких технічних станів можна розглядати як деякий клас об’єктів.

Отже, задача розпізнавання образів – це процес, який дозволяє віднести той чи інший об’єкт до певного класу за умови, що класи наперед визначені (відомі прецеденти).

З метою перевірки розробленої методики розбиття простору ознак і побудови роздільної кривої на компресорній станції КС-3 Долинського лінійного управління магістральних газопроводів ДП «Прикарпаттрансгаз» здійснювався вібраційний контроль ОУП відцентрового нагнітача ГПА-Ц1-16С/76-1,44 з газотурбінним привідним двигуном ДГ-90Л2. Через одну секунду реєструвались горизонтальні $(x_1 = z_h)$ і вертикаль-

ні $\left(x_2 = z_v\right)$ складові віброприскорення за допомогою штатних технічних засобів, якими оснащена компресорна станція КС-3. Спостереження здійснювались протягом 75,94 *год.* Для зменшення об'єму вхідної інформації із масиву даних вилучались точки з однаковими координатами. У результаті початковий масив даних скоротився із 273394 до 34 точок. Відповідно до [7] для кластеризації отриманих даних було вибрано три класи. Для розбиття діагностичних ознак на класи була використана мережа Кохонена [9]. Результат роботи нейромережі ілюструє рис. 1, де кружками відмічені центри кластерів, а цифри біля кружків означають номери класів. Перший, найнижчий, клас утворюють дані, які характеризують мінімальний рівень вібрації. Другий клас утворюють дані із середнім рівнем вібрації і, на кінець, третій, найвищий, клас характеризує високий рівень вібрації.

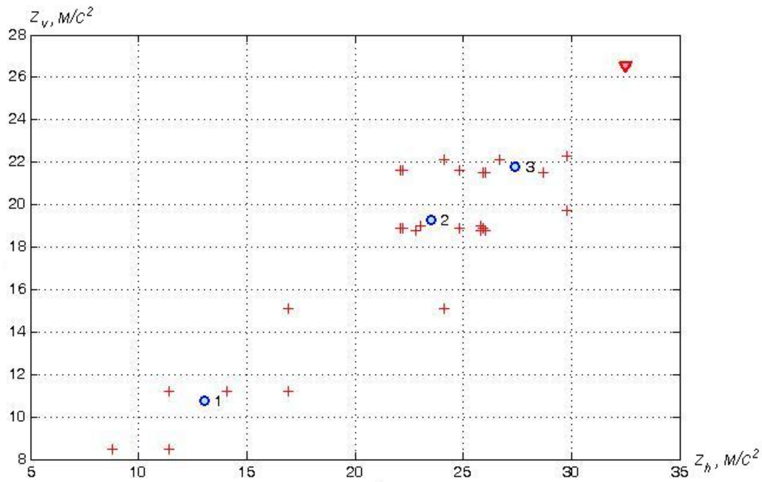


Рисунок 1 – Результат розбиття діагностичних ознак на класи за допомогою мережі

Для побудови роздільної кривої між першим і другим та між другим і третім класами був вибраний поліном третьої степені. Синтез полінома оптимальної складності здійснювався на основі функціонала (9) і за допомогою розробленого генетичного алгоритму. Параметри алгоритму були такими: $\alpha = 1$; $\beta = 0,01$; розмір популяції – 100; максимальна кількість генерацій – 100; ймовірність схрещування – 0,8; ймовірність мутації – 0,1.

У результаті отримали:

– рівняння першої роздільної кривої:

$$f\left(\overline{x},\overline{a}\right) = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_1^2,$$

де $a_0 = -0,232874$; $a_1 = 0,264554$; $a_2 = -0,015296$; $a_3 = -0,012428$;

– рівняння другої роздільної кривої:

$$f\left(\overline{x},\overline{a}\right) = a_0 + a_1x_1,$$

де $a_0 = 7,508388$; $a_1 = -0,305470$;

Відповідно функціонал (9) набув таких значень:

– для першої роздільної кривої – $F_{min}\left(\overline{a}_d\right) = 0,1374$;

– для другої роздільної кривої – $F_{min}\left(\overline{a}_d\right) = 0,8031$.

Роздільні криві побудовані шляхом розв’язку рівняння $f\left(\bar{x},\bar{a}\right)=0$ відносно змінної x_2:

– для першої роздільної кривої – $x_2=-\dfrac{a_0+a_1x_1+a_3x_1^2}{a_2}$;

– для другої роздільної кривої – $x_1=-\dfrac{a_0}{a_1}$.

Результати такої побудови відтворює рис. 2, із якого видно, що першою роздільною кривою відбулося безпомилкове розмежування першого і другого класів, а друга роздільна крива віднесла одну із діагностичних ознак до другого класу, а іншу – до третього класу, хоча нейромережею вони віднесені відповідно до третього і другого класів.

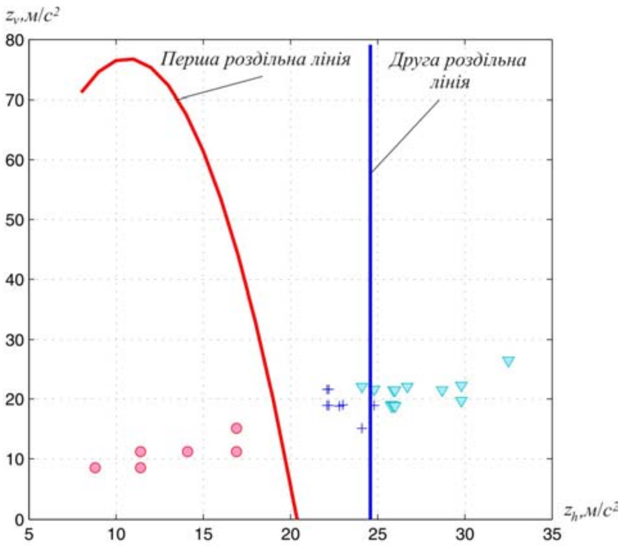


Рисунок 2 – Розбиття площини діагностичних ознак на класи за допомогою роздільних кривих

Висновки

Розроблений метод розбиття простору ознак на класи дає можливість з використанням генетичних алгоритмів вибрати оптимальні за складністю поліноми, які описують роздільні криві. Ефективність такого методу підтверджена на промислових даних, які отримані при експлуатації ВЦН в умовах Долинського лінійного управління магістральними газопроводами. Отримані результати відкривають можливості до здійснення оперативного технічного діагностування окремих вузлів ГПА і виявлення вузлів з критичним рівнем вібрації, що робить можливою безаварійну експлуатацію ГПА.

Література

1. Васильев В.И. Распознающие системы : [справочник] / Васильев В.И. – К. : Наукова думка, 1983. – 423 с.
2. Мурыгин К.В. Построение классификаторов на основе разделяющих поверхностей / К.В. Мурыгин // Штучний інтелект. – 2008. – № 2. – С. 65-69.

3. Горбійчук М.І. Індуктивний метод побудови математичних моделей газоперекачувальних агрегатів природного газу / М.І. Горбійчук, М.І. Когутяк, Я.І. Заячук // Нафтова і газова промисловість. – 2008. – № 5. – С. 32-35.
4. Химмельблау Д. Прикладное нелинейное программирование / Д. Химмельблау ; [пер. с англ. И.М. Быховской, Б.Т. Вавилова]. – М. : Мир, 1975. – 534 с.
5. Рутковская Д. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы / Рутковская Д., Пилиньский М., Рутковский Л. ; [пер. с польск. И.Д. Рудинского]. – М. : Горячая линия-Телеком, 2004. – 452 с.
6. Комплексні обстеження надземного механічного технологічного обладнання компресорних станцій магістральних газопроводів : СТП 320.30019801-2002. – Офіц. вид. – К. : ДК «Укртрансгаз», 2002. – 56 с.
7. Компресорне обладнання. Визначення вібраційних характеристик відцентрових компресорів та норми вібрації : ДСТУ 3161-95. – [Чинний від 2005-28-06]. – К. : Держстандарт України, 1996. – III, 18 с. – (Національні стандарти України).
8. Горбійчук М.І. Вібраційний контроль технічного стану газоперекачувальних агрегатів природного газу на засадах нейромереж / М.І. Горбійчук, С.Т. Самуляк // Нафтогазова енергетика. Всеукраїнський науково-технічний журнал. – 2009. – № 1(10). – С. 78-82.
9. Оссовский С. Нейронные сети для обработки информации / С. Оссовский ; [пер. с польск. И.Д. Рудинского]. – М. : Финансы и статистика, 2004. – 343 с.

М.И. Горбийчук, С.Т. Самуляк, И.В. Щупак

Синтез функций классификации на основе генетических алгоритмов

В данной статье предложен метод построения разделительных поверхностей на основе генетических алгоритмов. Разработанный способ разделения пространства признаков на классы даёт возможность выбрать оптимальные по сложности полиномы, описывающие разделительные кривые. Эффективность данного метода подтверждена промышленными данными. Полученные результаты открывают возможность проведения оперативной технической диагностики и нахождения отдельных узлов газоперекачивающего агрегата с критическим уровнем вибрации, что делает возможной его безаварийную эксплуатацию.

M.I. Gorbijchuk, S.T. Samulyak, I.V. Shchupak

Classification Functions Synthesis Based on Genetic Algorithms

In this paper a method for building the partition surfaces based on genetic algorithms, is proposed. The developed way of separating the feature space into classes makes it possible to choose the polynomials describing the dividing curves with optimal complexity. Efficiency of this method is confirmed by industrial data. The given results open the possibility of rapid technical diagnosis and finding the separate nodes of the gas pumping unit with the critical level of vibration, thus enabling its trouble-free operation.

Стаття надійшла до редакції 02.04.2010.